

Д. Г. ПРОНИН, канд. техн. наук, начальник Управления технического регулирования, ЦНИИП Минстроя России (Россия, 119331, г. Москва, просп. Вернадского, 29; e-mail: pronin.dg@mail.ru)

Д. В. КОНИН, канд. техн. наук, заведующий сектором высотных зданий и сооружений Лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, АО "НИЦ "Строительство" (Россия, 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 1, e-mail: kondan@inbox.ru)

УДК 05.26.03;614.841.33

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИХ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Рассмотрены предпосылки перехода на применение стальных конструкций при проектировании и строительстве высотных зданий. Приведены примеры пожаров с анализом их последствий для несущих строительных конструкций. Представлены сведения о конструктивных особенностях и результатах расследования причин обрушения башен Всемирного торгового центра в США. Проведено сравнение стальных и железобетонных конструкций при оценке их огнестойкости. Сделаны выводы о возможности применения стальных конструкций при проектировании и строительстве высотных зданий.

Ключевые слова: пожарная безопасность; высотные здания; огнестойкость; несущие конструкции; примеры пожаров; сталежелезобетон.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57

Введение

Небоскреб как тип здания возник в США благодаря внедрению стального проката и созданию конструкции стального каркаса в XIX веке [1], и до настоящего времени в США сталь остается лидирующим материалом несущих конструкций. Здания из железобетона стали активно возводиться лишь после Второй мировой войны, а в первой половине XX века строились эпизодически [2]. Однако даже в США монолитные железобетонные конструкции стали вытеснять стальные при возведении 30–50-этажных зданий.

Несмотря на это требования по обеспечению пожарной безопасности таких зданий до сих пор не разработаны в полном объеме. В первую очередь речь идет о необходимости сохранения основными строительными конструкциями здания несущей способности и, соответственно, о выработке рекомендаций по выбору материала несущих конструкций.

Для решения данного вопроса проведен анализ пожаров и их последствий в зданиях, возведенных с применением стальных и железобетонных конструкций; выполнена оценка нормативных и расчетных особенностей при применении указанных материалов; дан ответ на вопрос, какие преимущества имеют оба материала при строительстве высотных зданий.

Оценка последствий наиболее значимых пожаров в высотных зданиях

Появление новых возможностей в строительстве высотных сооружений вызвало необходимость выработки новых подходов к обеспечению безопасности людей, находящихся в них, а также к сохранению эксплуатационных свойств зданий в чрезвычайных ситуациях, поскольку их снос или реконструкция сопряжена с гораздо более высокими затратами и сложностями по сравнению с остальными типами зданий.

Наиболее распространенной чрезвычайной ситуацией, которая приводит к повреждению конструкций высотных зданий, является пожар [3]. По данным зарубежной статистики при пожаре в здании высотой более 25 этажей погибает в 3–4 раза больше людей, чем в 9–16-этажном доме [4].

Сравним несколько наиболее значимых пожаров в зданиях с несущими конструкциями из железобетона и стали.

Стальные конструкции без огнезащиты плохо противостоят пожару. На пожаре в 32-этажном офисном здании "Windsor Tower's" высотой 106 м в Мадриде в 2005 г. пожар распространился с 1-го до 32-го этажа. В здании было предусмотрено центральное железобетонное ядро и внешний стальной каркас, который во время пожара из-за отсутствия огнеза-



Рис. 1. Здание “Windsor Tower’s” в Мадриде после пожара
Fig. 1. The Windsor Tower’s building in Madrid after a fire

щиты обрушился на шести верхних этажах (рис. 1). Проект здания был выполнен по испанским строительным нормам 1970 г., когда еще не требовалась огнезащита стальных элементов. При этом в выводах, сделанных по результатам исследования данного пожара, указано, что если бы стальные элементы были с огнезащитой, то здание бы не обрушилось [5].

В отличие от мадридского пожара при пожаре в высотном 62-этажном здании в Лос-Анджелесе в 1988 г. благодаря удачной огнезащите несущих элементов, даже при несработавшей спринклерной системе пожаротушения, стальная конструкция небо-

скреба выдержала трехчасовое воздействие пламени.

При теракте и последующем пожаре во Всемирном торговом центре (ВТЦ) 11 сентября 2001 г. в Нью-Йорке (США) погиб 2451 человек, а ущерб составил 33,4 млрд. долл. [6]. Обрушение зданий ВТЦ — это первый случай полного разрушения высотного здания, а также первый известный случай разрушения здания со стальными несущими конструкциями [5].

Башни-близнецы являлись частью ВТЦ, рассчитанного на 50 тыс. рабочих мест и 80 тыс. посетителей ежедневно. Каждая башня имела высоту 411 м, 110 надземных этажей и 6 подземных.

Основная несущая система здания представляла собой “трубу” (наружную оболочку), образованную колоннами наружных стен, установленных с шагом 1,02 м. Все 59 колонн наружного периметра объединены между собой пластинами высотой 1,32 м в уровне каждого этажа. Наружная “труба” воспринимала все нагрузки от ветра и возможных землетрясений и часть вертикальных нагрузок от перекрытий. Внутренние 47 колонн ядра (где располагались лестничные клетки и лифты) воспринимали только вертикальные нагрузки от перекрытий. Вертикальный разрез здания и схематичное расположение колонн показаны на рис. 2.

Стальные конструкции зданий выполнены из 14 различных видов сталей с пределом текучести от 250 МПа (аналог отечественной стали Ст3 или

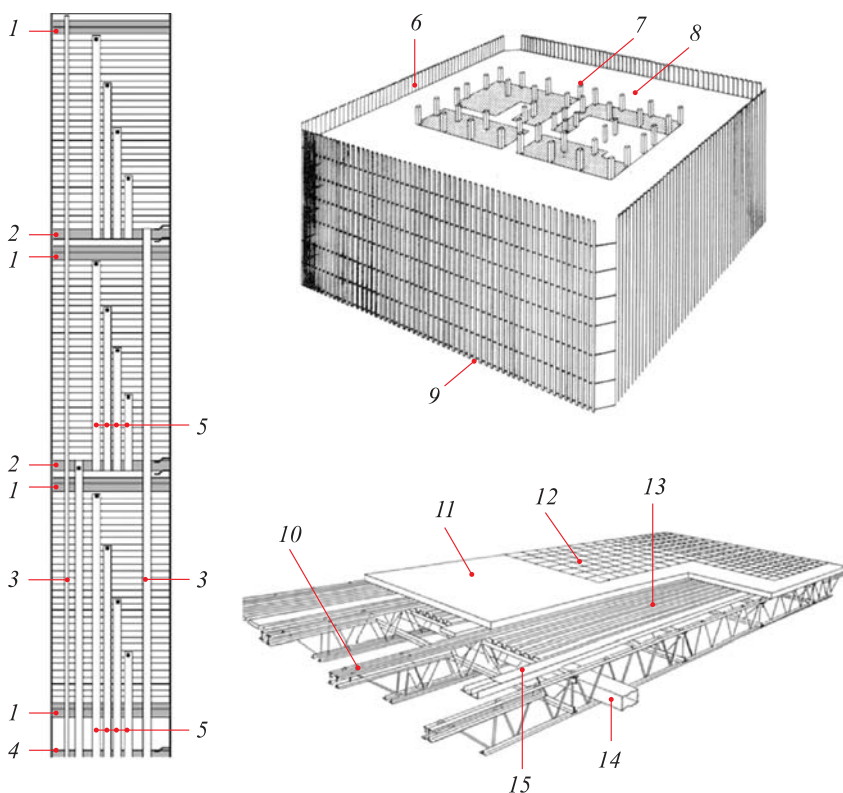


Рис. 2. Схематичный разрез здания, схема вертикальных несущих конструкций и конструкция перекрытия [7]: 1 — техническое обслуживание; 2 — смотровая площадка; 3 — лифт-экспресс; 4 — уровень Plaza; 5 — локальный лифт; 6 — наружная поверхность трубы; 7 — центральный стержень колонны; 8 — плита перекрытия; 9 — 59 колон с каждой стороны; 10 — стержень; 11 — бетон; 12 — покрытие пола; 13 — сквозной настил; 14 — система кондиционирования; 15 — канал для прокладки электрики

Fig. 2. Schematic section of the building, scheme of the vertical load-bearing structures and the ceiling structure [7]: 1 — technical services; 2 — skylobby; 3 — express elevators; 4 — Plaza level; 5 — local elevators; 6 — exterior framed-tube; 7 — central core columns; 8 — floor slab; 9 — 59 columns per side; 10 — bar; 11 — concrete; 12 — floor covering; 13 — tough decking; 14 — air-conditioning; 15 — electric duct

C245) до 690 МПа (аналог отечественной стали С690). Использование столь значительного количества видов сталей помогло унифицировать размеры конструкций, а главное — размеры их поперечных сечений, а также снизить нагрузки от собственного веса конструкций.

Перекрытие башен выполнено с максимальной унификацией в виде монолитной плиты по стальным фермам высотой 900 мм, разложенным с шагом 2,04 м. Фермы перекрытий, кроме вертикальных нагрузок от собственного веса, людей и оборудования, воспринимали часть ветровой нагрузки и распределяли ее через плиту и горизонтальные связи равномерно по плану здания. Так как при сильных ветрах раскачивание здания могло вызывать дискомфорт у людей (что подтвердилось испытаниями при проектировании), было также решено нижний пояс ферм закрепить к наружным колоннам периметра с помощью вязкоупругих демпферов, которые должны гасить горизонтальные колебания башен. В финальном отчете National Institute of Standards and Technology по результатам расследования [8] авторы не скрывают своего удивления, насколько смелым было решение о внедрении столь большого количества инноваций в конструкцию перекрытий [8].

Для наружной отделки колонн применены алюминиевые панели. Наружная огнезащита выполнена из напыляемого материала, а внутренняя — из твердых вермикулитовых плит, которые одновременно являлись основой для внутренней финишной отделки (рис. 3). Фермы перекрытий защищены напыляемым огнезащитным материалом.

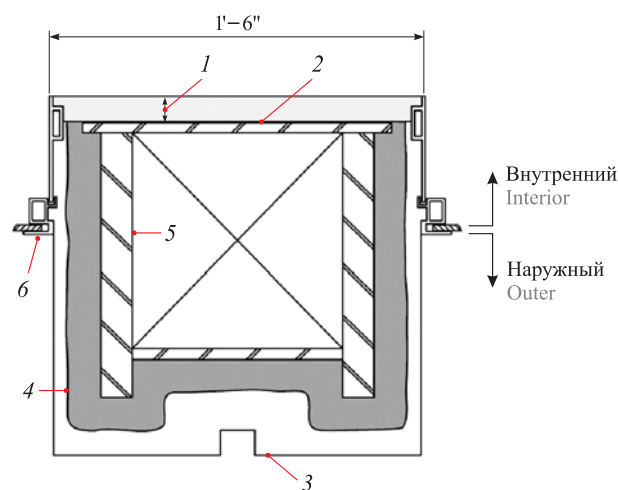


Рис. 3. Огнезащита и отделка наружной коробчатой колонны [8]: 1 — покрытие из вермикулита разной толщины; 2 — внутренняя грань; 3 — типовая колонна с алюминиевым покрытием; 4 — напыление огнезащитного состава; 5 — стальная колонна; 6 — стеновая панель с окном

Fig. 3. Fire retardance and finishing of outer box column [8]: 1 — vermiculite plaster thickness varies; 2 — interior face; 3 — typical column aluminum cover; 4 — SFRM; 5 — steel column; 6 — window panel

В целом результаты расследования показали высокую надежность запроектированных конструкций, которые смогли выдержать удары самолетов на большой скорости, но в то же время выявили низкую степень активной и пассивной защиты от пожара конструкций и здания в целом.

Установлено, что причиной прогрессирующего обрушения конструкций являлась совокупность конструктивных особенностей здания, а именно:

1) недостаточное количество огнезащитного напыляемого покрытия на конструкциях колонн, а главное на трудных для обработки элементах прутковых ферм и прогонов (значительная часть конструкций была обработана некачественно или не обработана вовсе; конструкции частично утратили огнезащиту в процессе эксплуатации и не были отремонтированы);

2) разрушение значительного количества напыляемого огнезащитного покрытия вследствие удара самолетов, т. е. под действием вибрационной и ударной нагрузки;

3) наличие значительных прогибов и деформаций главных и второстепенных прутковых ферм, их частичное или полное разрушение на этажах, где был сосредоточен удар самолета и последовавший за ним пожар;

4) разрушение на каждом этаже, охваченном пожаром, от 1/3 до 2/3 узлов опирания конструкций ферм на колонны, которые вследствие этого потеряли раскрепление из плоскости;

5) вследствие разрушения и значительных деформаций конструкций перекрытий, а также в силу одновременного нагрева колонн, потерявших раскрепление из плоскости, значительное количество колонн периметра и ядра начали выпучиваться и терять устойчивость, что запустило процесс прогрессирующего обрушения зданий.

В отчете особо отмечается, что если бы значительное количество огнезащитного материала на конструкции сохранилось после удара, то здание с большой вероятностью не обрушилось бы. Ввиду значительных отступлений от проектных решений в части огнезащиты конструкции перекрытий не обладали положенным пределом огнестойкости, равным 2 ч.

На основании всестороннего исследования [8] сформулированы 30 рекомендаций по проектированию зданий и повышению их надежности и безопасности. Заметим, что только 3 из них посвящены улучшению расчетов, 12 — улучшениям проектирования и процедур сертификации огнезащиты и систем защиты от пожара, 7 — улучшению условий эвакуации из зданий и 8 — улучшению организационных мероприятий для специальных служб. Ни в одной из приведенных в [8] рекомендаций

не дается отрицательных оценок тому или иному материалу несущих конструкций или огнезащиты, той или иной несущей системе и конструктивному решению.

Конструкции небоскребов ВТЦ выдержали столкновение с самолетами, но металлический каркас и узлы сочленений конструкций не устояли при пожаре [9]. Самолет, врезавшийся в одно из зданий ВТЦ, был загружен топливом по максимуму [10]. В результате его пролива в здании произошло углеводородное горение с большим тепловыделением, чем то, на которое рассчитана защита типовых зданий. Однако невозможно все здания проектировать с учетом вероятности террористических атак [11].

При этом металл лучше, чем бетон, противостоит динамическим нагрузкам и, например, при внутреннем взрыве (теракте) с большей вероятностью сохранит несущую способность. Например, разрушение конструкций 22-этажного здания апартаментов из сборного железобетона в Лондоне 16 мая 1968 г. привлекло внимание конструкторов к прогрессирующему обрушению. Внешние несущие стены разрушились из-за взрыва газа на 18-м этаже, что привело к прогрессирующему разрушению в угловом отсеке вверх до кровли и вниз до нескольких этажей от уровня земли [12].

Таким образом, существуют и преимущества, и недостатки проектирования конструкций как железобетонных, так и стальных, которые следует рассмотреть подробнее.

Расчетные обоснования и нормативные требования к огнестойкости несущих конструкций

Нормативными требованиями по пожарной безопасности не ограничивается выбор материала, из которого должны быть изготовлены конструкции, в том числе несущие. Главное, чтобы они удовлетворяли нормативным положениям. В Техническом регламенте о требованиях пожарной безопасности [13] предъявляются требования к огнестойкости и классу конструктивной пожарной опасности несущих конструкций. И сталь, и бетон являются негорючими материалами и соответствуют наиболее высокому классу конструктивной пожарной опасности К0.

Что касается огнестойкости, то традиционно считается, что железобетонные конструкции лучше стальных сохраняют свою устойчивость при пожаре. При этом, поскольку сталь считалась менее огнестойким материалом, чем бетон, большинство исследований были сфокусированы именно на ней [14]. Такой однозначный подход не учитывает ряд особенностей.

Несущая способность и стальных, и железобетонных конструкций по огнестойкости (признак R)

определяется временем достижения предельного состояния конструкции при ее испытании по “стандартной” температурной шкале, приведенной в ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834–75). При этом потеря несущей способности стальной конструкции определяется временем достижения образцом критической температуры [15].

В железобетонных конструкциях, в которых наблюдается хрупкое разрушение по сжато-растянутому бетону (колонны с малым эксцентриситетом, изгибаемые переармированные элементы), за потерю несущей способности принимается полное разрушение конструкции во время пожара. Изгибаемые, внецентренно сжатые и растянутые с большим эксцентриситетом элементы (которых большинство) характеризуются развитием больших необратимых деформаций арматуры и бетона, и за потерю несущей способности принимается развитие прогиба еще до того, как наступит полное разрушение [15].

Здесь следует отметить очень важный момент: предел огнестойкости железобетонной конструкции наступает при нагреве бетона в расчетном сечении выше его критической температуры, а также при прогреве рабочей арматуры в конструкции до критической температуры [15–17]. Критическая температура нагрева арматуры характеризует стадию образования пластического шарнира в растянутой зоне железобетонных конструкций и наступление предела огнестойкости при огневом воздействии.

Таким образом, и для стальных, и для железобетонных несущих конструкций предел огнестойкости определяется временем достижения критической температуры стальными элементами. Разница заключается только в том, что в железобетоне уже заложен “огнезащитный” слой бетона, а для стальных конструкций его нужно предусматривать отдельно.

При этом, как мы говорили выше, как есть преимущества и недостатки применения железобетона или стали, так есть преимущества и недостатки применения для огнезащиты слоя бетона или специальных средств для огнезащиты. Например, в США до 1970-х годов бетон был наиболее распространенным огнезащитным материалом для стальных конструкций, но на сегодняшний день его вытеснили современные более легкие материалы, в первую очередь напыляемые [11, 18–20].

Преимущества применения железобетона для огнезащиты очевидны, поэтому приведем основные недостатки: увеличение толщины защитного слоя до арматуры приводит к снижению прочностных характеристик и увеличению веса конструкции; при пределах огнестойкости более 150 мин (для зданий выше 100 м требуется 180 мин, а выше 150 м — 240 мин [21]) несущие железобетонные перекрытия и балки, как правило, все равно нуждаются в огне-



Рис. 4. Откалывание защитного слоя бетона и оголение арматуры

Fig. 4. Spalling of the protective layer of concrete and exposure of reinforcement

защите; присутствующая влага (физически и химически связанная вода) при нагреве начинает преобразовываться в пар и создает внутреннее давление, приводящее к так называемому взрывообразному откалыванию бетона [11, 15, 22–24]. Есть и другие причины откалывания бетона при повышении температуры, но суть понятна: арматура при таком процессе оголяется (рис. 4).

При применении специальных огнезащитных материалов на стальных конструкциях возможно достижение пределов огнестойкости до 240 мин, снижение веса конструкции по сравнению с аналогичным по огнестойкости слоем бетона, отсутствие взрывообразного разрушения. Преимущества более прочного материала — бетона необходимо сравнить с преимуществами огнезащитных материалов, чтобы выбрать приемлемое решение [11].

Таким образом, выбор материала несущих конструкций должен быть основан на современных представлениях об огнезащите с учетом экономической эффективности.

Здесь нельзя не отметить, что традиционные подходы к обеспечению огнестойкости, при которых испытаниям (или расчету) подвергаются отдельные

конструкции, после чего делается вывод об огнестойкости всего здания в целом, а также применение “стандартной” температурной кривой пожара для испытаний не отвечают требованиям по обеспечению пожарной безопасности высотных зданий. Это обусловлено тем, что ввиду сложности доступа пожарных подразделений к очагу пожара и эвакуации людей, а также из-за значительно более трагичных последствий пожаров в них необходимо обеспечить огнестойкость конструкций на все время возможного пожара, рассчитывая при этом реальный температурный режим. Авторами статьи при разработке СП 267.1325800.2016 [21] было включено в него требование, позволяющее оценивать огнестойкость конструкций при развитии реального пожара.

Заключение

Анализ пожаров, нормативных требований и особенностей расчетов огнестойкости показал, что железобетонные и стальные конструкции имеют как преимущества, так и недостатки. При качественной огнезащите стальные конструкции вполне способны обеспечить необходимую огнестойкость здания и снижение его веса, а также сокращение стоимости строительства. В то же время железобетон традиционно воспринимается как более надежный материал и имеет свои преимущества, в том числе в плане эксплуатации.

В настоящее время ведутся работы по внедрению конструкций из сталежелезобетона, который сочетает в себе преимущества двух материалов. Так, авторами статьи разработан свод правил “Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования” [25], который содержит нормативные положения по расчету на огнестойкость таких конструкций, в том числе сталежелезобетонных плит. Это дает возможность применять их в России, так как при классическом подходе к огнезащите таких плит экономическая эффективность стремилась к нулю. На основании вышесказанного сделан вывод, что работу в данном направлении необходимо продолжить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуллер В. Конструкции высотных зданий // Пер. с англ. — М. : Стройиздат, 1979. — 248 с.
2. Маклакова Т. Г. Высотные здания. Градостроительные и архитектурно-конструктивные проблемы проектирования : монография. — 2-е изд., доп. — М. : Изд-во АСВ, 2008. — 160 с.
3. Stafford Smith B., Coull A. Tall building structures: analysis and design. — New York : John Wiley & Sons, Inc., 1991. — 537 p.
4. Highrise Fires // U. S. Fire Administration. Topical fire research series. — January 2002. — Vol. 2, Issue 18.
5. Tall concrete buildings subjected to vertically moving fires: A case study approach. — Edinburgh : The University of Edinburgh, 2009.
6. Fire in the United States 1995–2004. — 14th ed. — Washington, U. S. : FEMA, August 2007. — 65 p.

7. Lew H. S., Bukowski R. W., Carino N. J. Design, construction, and maintenance of structural and life safety systems / NIST NCSTAR 1-1. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. — Washington : U. S. Government Printing Office, 2005. — 218 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1-1.
8. Sunder S. S., Gann R. G., Grosshandler W. L., Lew H. S., Bukowski R. W., Sadek F., Gayle F. W., Gross J. L., McAllister T. P., Averill J. D., Lawson J. R., Nelson H. E., Cauffman S. A. Final report on the collapse of the World Trade Center towers / NIST NCSTAR 1. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. — Washington : U. S. Government Printing Office, 2005. — 248 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1.
9. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures / NIST GCR 15-984. — Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. — 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984.
10. A briefing on the World Trade Center attacks // Fire Protection Engineering. — 2002. — No. 13. — P. 46–52.
11. Guidelines for designing fire safety in very tall buildings: Public Review Draft. Society of Fire Protection Engineers, March 2012. — 152 p. URL: http://inti.gov.ar/cirsoc/pdf/fuego/Public_Review_Draft.pdf (дата обращения: 01.12.2017).
12. Al-Salloum Y. A., Abbas H., Almusallam T. H., Ngo T., Mendis P. Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. — 2017. — Vol. 29, Issue 4. — P. 313–320. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.06.005.
13. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 01.12.2017).
14. Kotsovinos P. Analysis of the structural response of tall buildings under multifloor and travelling fires. — Edinburgh : The University of Edinburgh, 2013.
15. Демехин В. Н., Мосалков И. Л., Плюснина Г. Ф., Серков Б. Б., Фролов А. Ю., Шурин Е. Т. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре : учебник. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. — 656 с.
16. СТО 36554501-006–2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. — М. : НИЦ “Строительство”, 2006. — 79 с. URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/249033/ (дата обращения: 01.12.2017).
17. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 193. — P. 27–34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182.
18. Razdolsky L. Structural fire loads: Theory and principles. — New York : McGraw-Hill Education, 2012. — 448 p.
19. Yellow book. Fire protection for structural steel in buildings. — 5th ed. — United Kingdom : Association for Specialist Fire Protection, July 2014. — Vol. 1. — 115 p.
20. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. — 2018. — Vol. 95. — P. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.
21. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044284> (дата обращения: 01.12.2017).
22. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. — М. : Стройиздат, 1998. — 304 с.
23. Phan L. T., McAllister T. P., Gross J. L., Hurley M. J. (eds.). Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings / NIST Technical Note 1681. — Gaithersburg, Maryland : NIST, 2010. — 200 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1681.
24. Goode M. G. (ed.). Fire protection of structural steel in high-rise buildings / NIST GCR 04-872. — Gaithersburg, Maryland : NIST, 2004. — 80 p. URL: <https://www.pdhexpress.com/pdhcourse/pdf/fire-protection-of-structural-steel-in-high-rise-buildings.pdf> (дата обращения: 01.12.2017).
25. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044285> (дата обращения: 01.12.2017).

Материал поступил в редакцию 10 декабря 2017 г.

Для цитирования: Пронин Д. Г., Конин Д. В. Проблемы применения стальных и железобетонных несущих конструкций высотных зданий с точки зрения их огнестойкости // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 1. — С. 50–57. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57.

PROBLEMS OF APPLICATION OF STEEL AND REINFORCED CONCRETE BEARING STRUCTURES FOR TALL BUILDINGS WITH RESPECT TO THEIR FIRE RESISTANCE

PRONIN D. G., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Technical Regulation, TsNIIP Ministry of Russia (Vernadskogo Avenue, 29, Moscow, 119331, Russian Federation; e-mail: pronin.dg@mail.ru)

KONIN D. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Sector of High-Rise Buildings and Constructions of Metal Structures Laboratory, V. A. Kucherenko Central Scientific Research Institute for Building Structures, JSC Research Center of Construction (2-ya Institutskaya St., 6, build. 1, Moscow, 109428, Russian Federation; e-mail: konden@inbox.ru)

ABSTRACT

The most common emergency that causes damage to structures high-rise buildings, is a fire. On the fire in high-rise, the 62-storey building in Los Angeles in 1988, even if not triggered the sprinkler fire-fighting system, thanks to the successful fire protection of load-bearing elements of the steel structure of the skyscraper withstood a three-hour exposure to flame. In a fire at a 106-metre 32-storey office building “Windsor Tower” in Madrid in 2005, an external unprotected steel frame collapsed on 6 upper floors.

The results of the investigation of the consequences of a terrorist attack at the World Trade Center in the US showed high reliability designed steel structures, which could withstand impacts of planes at high speed, but shows a low level is applied to the active and passive protection of structures and buildings from fire. On the basis of a comprehensive study is not given negative evaluations of a particular material of load-bearing structures or fire protection or a carrier system and a constructive solution.

Traditionally it is considered, that concrete construction is better than steel, retain their stability in a fire. This approach does not take into account a number of features. Fire resistance of reinforced concrete structures occurs when the heating of the concrete in the calculated cross section above its critical temperature and when heating of the working bars in the structure to the critical temperature. Thus, for steel structures, and reinforced concrete structures, fire resistance is determined by the time of reaching the critical temperature of steel elements. The only difference is that the concrete already laid, “fire-resistant” layer of concrete, and for steel structures it is necessary to provide separately. With the use of special fire resistant materials to steel structures, it is possible to achieve fire resistance up to 240 minutes, reduced structural weight compared to similar fire-resistant layer of concrete, the lack of explosive destruction.

Thus, the choice of material of supporting structures should be based on modern concepts about fire protection with efficiency in mind.

Currently, work is underway on implementation of structures made of steel-concrete which combines the features of two materials.

Keywords: fire safety; high-rise buildings; fire resistance; supporting structures; examples of fires; reinforced concrete.

REFERENCES

1. Schueller W. *High-rise building structures*. New York, London, Sydney, Toronto, John Wiley & Sons, 1977. 274 p. (Russ. ed.: Schueller W. *Konstruktsii vysootnykh zdaniy*. Moscow, Stroyizdat, 1979. 248 p.).
2. Maklakova T. G. *Vysotnyye zdaniya. Gradostroitelnyye i arkhitekturno-konstruktivnyye problemy proyektirovaniya. Monografiya* [A high-rise building. Urban and architectural-constructive design problems. Monograph]. 2nd ed. Moscow, Publishing house ASV, 2008. 160 p. (in Russian).
3. Stafford Smith B., Coull A. *Tall building structures: analysis and design*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991. 537 p.
4. *Highrise Fires*. U. S. Fire Administration. Topical fire research series. January 2002, vol. 2, issue 18.
5. *Tall concrete buildings subjected to vertically moving fires: A case study approach*. Edinburgh, The University of Edinburgh, 2009.
6. *Fire in the United States 1995–2004*. 14th ed. Washington, U. S., FEMA, August 2007. 65 p.

7. Lew H. S., Bukowski R. W., Carino N. J. *Design, construction, and maintenance of structural and life safety systems*. NIST NCSTAR 1-1. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. Washington, U. S. Government Printing Office, 2005. 218 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1-1.
8. Sunder S. S., Gann R. G., Grosshandler W. L., Lew H. S., Bukowski R. W., Sadek F., Gayle F. W., Gross J. L., McAllister T. P., Averill J. D., Lawson J. R., Nelson H. E., Cauffman S. A. *Final report of the collapse of the World Trade Center towers*. NIST NCSTAR 1. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. Washington, U. S. Government Printing Office, 2005. 248 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1
9. Garlock M., Kruppa J., Li G. -Q., Zhao B. *White paper on fire behavior of steel structures*. NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984.
10. A briefing on the World Trade Center attacks. *Fire Protection Engineering*, 2002, no. 13, pp. 46–52.
11. Guidelines for designing fire safety in very tall buildings: Public Review Draft. *Society of Fire Protection Engineers*, March 2012. 152 p. Available at: http://inti.gov.ar/cirsoc/pdf/fuego/Public_Review_Draft.pdf (Accessed 1 December 2017).
12. Al-Salloum Y. A., Abbas H., Almusallam T. H., Ngo T., Mendis P. Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2017, vol. 29, issue 4, pp. 313–320. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.06.005.
13. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. on 29.07.2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 1 December 2017).
14. Kotsovinos P. *Analysis of the structural response of tall buildings under multifloor and travelling fires*. Edinburgh, The University of Edinburgh, 2013.
15. Demekhin V. N., Mosalkov I. L., Plyusnina G. F., Serkov B. B., Frolov A. Yu., Shurin E. T. *Zdaniya, sooruzheniya i ikh ustoychivost pri pozhare*. *Uchebnik* [Buildings, constructions and their stability under fire. Textbook]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2003. 656 p. (in Russian).
16. *Organization Standard 36554501-006–2006. Fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures*. Moscow, NITs “Stroitelstvo” Publ., 2006. 79 p. (in Russian). Available at: https://ohranatru-da.ru/ot_biblio/norma/249033/ (Accessed 1 December 2017).
17. Kowalski R. The use of Eurocode model of reinforcing steel behavior at high temperature for calculation of bars elongation in RC elements subjected to fire. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 193, pp. 27–34. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.182.
18. Razzdolsky L. *Structural fire loads: Theory and principles*. New York, McGraw-Hill Education, 2012. 448 p.
19. *Yellow book. Fire protection for structural steel in buildings*. 5th ed. United Kingdom, Association for Specialist Fire Protection, July 2014, vol. 1. 115 p.
20. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 2018, vol. 95, pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004.
21. *Set of rules 267.1325800.2016. High rise buildings and complexes. Design rules* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456044284> (Accessed 1 December 2017).
22. Milovanov A. F. *Stoykost zhelezobetonnykh konstruksiy pri pozhare* [Durability of reinforced concrete structures in fire]. Moscow, Stroyizdat, 1998. 304 p. (in Russian).
23. Phan L. T., McAllister T. P., Gross J. L., Hurley M. J. (eds.). *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2010. 200 p. DOI: 10.6028/nist.tn.1681.
24. Goode M. G. (ed.). *Fire protection of structural steel in high-rise buildings*. NIST GCR 04-872. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2004. 80 p. Available at: <https://www.pdhexpress.com/pdhexpress/pdf/fire-protection-of-structural-steel-in-high-rise-buildings.pdf> (Accessed 1 December 2017).
25. *Set of rules 266.1325800.2016. Composite steel and concrete structures. Design rules* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456044285> (Accessed 1 December 2017).

For citation: Pronin D. G., Konin D. V. Problems of application of steel and reinforced concrete bearing structures for tall buildings with respect to their fire resistance. *Pozharovzryvobezопасnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 50–57 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.50-57.